

# Simulation Monte Carlo

2<sup>ème</sup> Année Majeure Ingénierie Physique & Capteurs



Cours & Travaux Pratiques : 24h

J.C. Angélique

Examen Pratique : ~ 3h

Liens:

Noyaux et rayonnements (1<sup>er</sup> année)

Interaction rayonnement matière (2A 1<sup>er</sup> semestre)

Détecteurs de rayonnements ionisants (2A 2<sup>ème</sup> semestre)

Biblio:

<http://www.muonsinternal.com/muons3/G4beamline>

<http://www.muonsinternal.com/muons3/g4beamline/G4beamlineUsersGuide.pdf>

<http://accelconf.web.cern.ch/p07/PAPERS/THPAN103.PDF>

<https://geant4.web.cern.ch/node/1>

<https://root.cern/>

<https://www.nist.gov/pml/x-ray-mass-attenuation-coefficients>

<https://www.nist.gov/pml/x-ray-and-gamma-ray-data>

# Simulations numériques

Les simulations ont des intérêts multiples. C'est un outil utilisé dans de nombreux domaines comme l'ingénierie, la recherche, etc... pour étudier les comportements moyens d'un élément soumis à une ou plusieurs actions.

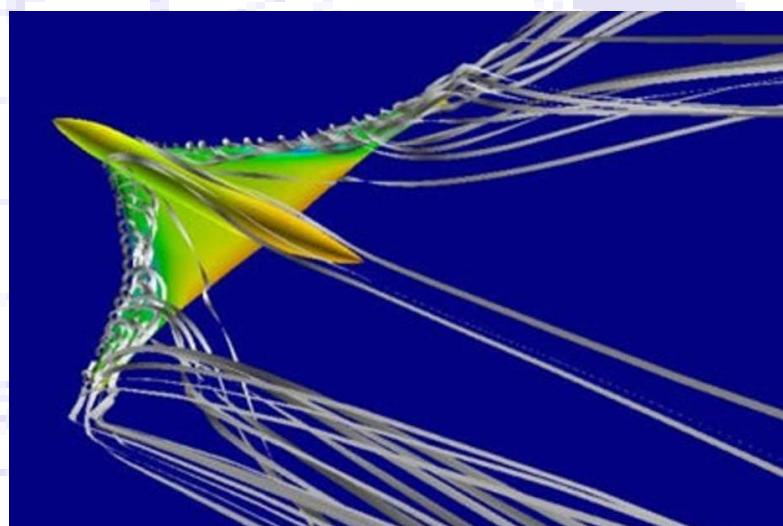
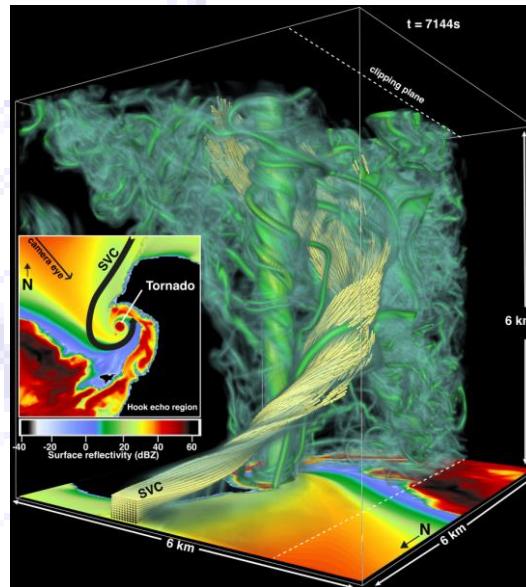
L'idéal serait de tenter l'expérience, mais dans de nombreux cas l'expérience est irréalisable, trop prenante en temps et en argent, trop longue ....

La simulation permet donc de reproduire le plus fidèlement possible l'expérience afin d'optimiser la réalisation prévue en aidant à la compréhension et à la modélisation du phénomène étudié et aussi de pouvoir faire des prévisions.

On a ainsi, de nos jours, de plus en plus recours à la simulation qui est devenue indispensable dans des domaines de plus en plus nombreux. Les simulations font parties des développements de l'utilisation du numérique au même titre que le développement de l'Intelligence Artificielle et du Deep Learning.

A noter qu'il existe différents types de simulations. Lorsque l'outil de simulation utilise un ordinateur on parle de simulation numérique et lorsque ce dernier utilise de l'électronique analogique on parle de simulation analogique.

# Exemples: Observation modélisation, simulations et banc de tests



# Processus déterministes et stochastiques

Il existe deux grand type de processus, les processus déterministes et les processus stochastiques.

Un **processus déterministe** est un processus qui réagit toujours de la même façon à un événement, c'est-à-dire que, quoi qu'il se soit passé auparavant, à partir du moment où le système arrive dans un état donné, son évolution sera toujours identique.

Un **processus stochastique ou probabiliste ou processus aléatoire** représente une évolution, discrète ou à temps continu, d'une variable aléatoire. Celle-ci intervient dans le calcul classique des probabilités, où elle mesure chaque résultat possible à une interaction .

En neutronique par exemple les codes de **calculs déterministes** tels que DRAGON résolvent numériquement l'équation du transport, après discréttisation de cette équation en groupes d'énergie et dans l'espace à la différence des **codes stochastiques** qui simulent l'histoire de chaque particule individuellement puis en déduisent des estimations statistiques pour les grandeurs physiques recherchées.

les codes de **calculs déterministes** permettent ainsi de calculer des grandeurs d'intérêt pour la sûreté plus rapidement que les **codes stochastiques**, avec le fractionnement du calcul de cœur en plusieurs étapes et l'utilisation d'hypothèses simplificatrices et de méthodes numériques résolvant l'équation du transport. Lors de l'utilisation de ces codes, il faut donc choisir les méthodes de calculs adaptées de façon à trouver un bon équilibre entre la précision désirée et le temps de calcul.

# Simulations Monte Carlo

Les simulations Monte Carlo sont des simulations **probabilistes**.

La méthode Monte Carlo en référence aux jeux existants dans les casinos de Monte Carlo est une méthode basée sur l'utilisation des nombres aléatoires pour simuler des systèmes déterministes avec des paramètres ou des entrées stochastiques. Cette méthode a prouvé son efficacité dans de nombreux domaines scientifiques comme les mathématiques, les finances, la physique, la biologie, les télécommunications...etc.

Le nom de cette méthode, qui fait allusion aux jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo, a été inventé en 1947 par Nicholas Metropolis, et publié pour la première fois en 1949 dans un article coécrit avec Stanislaw Ulam.



Stanislaw Ulam 1909~1984

Le véritable développement des méthodes de Monte-Carlo s'est effectué sous l'impulsion de John von Neumann et Stanislaw Ulam notamment, lors de la Seconde Guerre mondiale et des recherches sur la fabrication de la bombe atomique lors du projet Manhattan. Projet trop complexe pour être résolus classiquement.

## Simulations Monte Carlo

La méthode de Monte Carlo consiste à réaliser un grand nombre de tirages aléatoires pour résoudre un problème donné. La moyenne des résultats de ce grand nombre de tirage converge vers la solution.

La valeur du résultat s'obtient à l'aide des grands nombres, la précision sur ce résultat suit le théorème central limite (TCL\*).

En physique nucléaire et physique des particules de nombreux codes de simulations probabilistes existent. On peut ainsi citer (liste non exhaustive) :  
PENELOPE, MCNPX, FLUKA, PHITS, GEANT4, GATE, G4beamline.....

En complément de la théorie, ces simulations permettent de reproduire les phénomènes possibles lors des réactions.

Utiliser avant une expérience, elles permettent de mieux adapter le système de détection ou la géométrie au but recherché.

Utiliser après l'expérience, elles permettent d'aider à l'analyse des données et de comprendre les résultats obtenus.

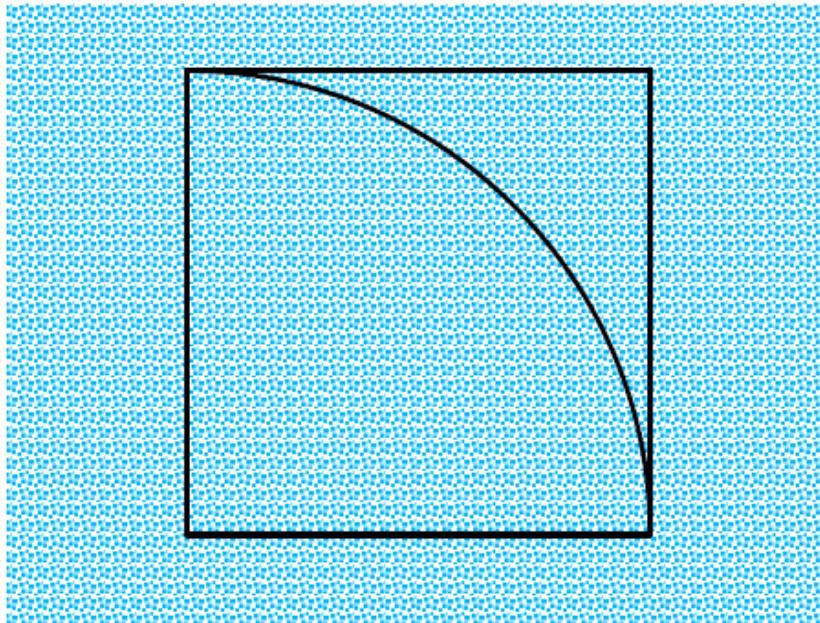
\* TCL: Théorème Central Limite établit la convergence en loi de la somme d'une suite de variables aléatoires vers la loi normale.

## Principe de la méthode

La méthode repose sur l'utilisation de **nombres aléatoires** pour calculer une grandeur qui ne l'est pas.

### Exemple: calcul du nombre pi .

Calcul de  $\pi$  en bombardant au hasard et uniformément un carré de côté 1 avec n'importe quoi !



- Le nombre de projectiles dans le carré est proportionnel à son aire
- Le nombre de projectiles dans le  $\frac{1}{4}$  de cercle est proportionnel à son aire

$$N_{\text{carré}} \propto 1^2$$
$$N_{\text{cercl}} \propto \pi 1^2 / 4$$

$$\rightarrow N_{\text{cercl}} / N_{\text{carré}} = \pi / 4$$

Il suffit de compter le nombre de projectiles dans le carré et dans le cercle pour obtenir la valeur de  $\pi$  !

Plus le nombre de projectiles sera grand plus la valeur de  $\pi$  trouvé sera proche de la valeur réelle c'est-à-dire plus la statistique sera importante plus grande sera la précision sur le résultat.

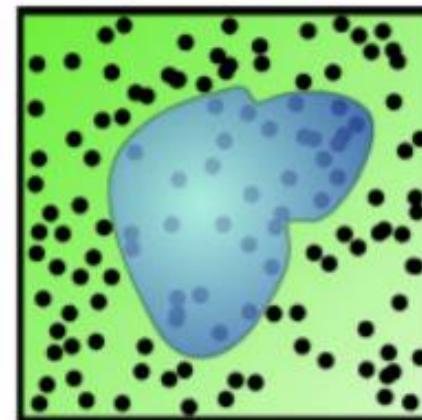
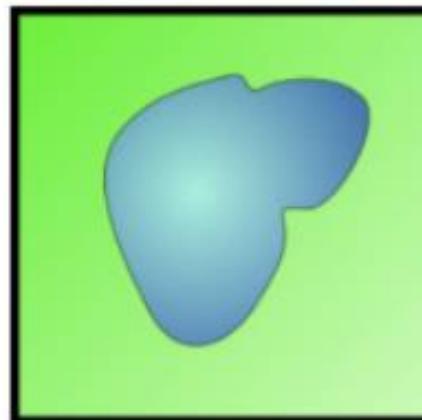
## Autre exemple: calcul de la surface d'un lac.

Prenons l'exemple suivant : déterminer la surface d'un lac. Soit une zone rectangulaire ou carrée dont les côtés sont de longueurs connues. Au sein de cette aire se trouve un lac dont la superficie est inconnue. Grâce aux mesures des côtés de la zone, on connaît l'aire du rectangle. Pour trouver l'aire du lac, on demande à la population du coin de lancer  $N$  cailloux de manière aléatoire sur cette zone.

On compte ensuite le nombre  $n$  de cailloux qui sont restés sur le terrain ; on peut ainsi déterminer le nombre de cailloux  $k = N - n$  qui sont tombés dans le lac.

Il suffit ensuite d'établir un rapport entre les valeurs :  $\frac{\text{aire du lac}}{\text{aire du terrain}} = \frac{k}{N}$ , et par suite,

$$\text{aire du lac} = \frac{k}{N} \times \text{aire du terrain}.$$



## Génération de nombre aléatoire

La qualité et la précision des résultats de la simulation réside donc notamment dans la qualité de la génération des nombres aléatoires.

Un générateur de nombres aléatoires, « random number generator » (RNG) en anglais, est un dispositif capable de produire une séquence de nombres pour lesquels il n'existe aucun lien déterministe (connu) entre un nombre et ses prédecesseurs, de façon que cette séquence puisse être appelée « suite de nombres aléatoires ».

Par extension, on utilise ce terme pour désigner des générateurs de nombres pseudo aléatoires, pour lesquels ce lien déterministe existe, mais ne peut pas « facilement » être déduit.

De nombreuses méthodes pour obtenir des nombres aléatoires existent depuis très longtemps et sont utilisées dans les jeux de hasard : dés, roulette, tirage au sort, etc.  
Elles peuvent toutefois souffrir (et souffrent généralement) de biais.

Actuellement, les meilleures méthodes, censées produire des suites véritablement aléatoires, sont des méthodes physiques (radioactivité, bruits thermiques, bruits électromagnétiques, mécanique quantique) qui profitent du caractère aléatoire de ces phénomènes.

### Exemple de génération uniforme ou plate entre a et b.

- Génération uniforme entre 0 et 1.
- Multiplication par la valeur  $b-a$  pour avoir une distribution uniforme entre 0 et  $b-a$ .
- Ajout d'une constante  $a$  pour avoir une distribution entre  $a$  et  $b$ .

## Distributions rectangulaires

Nous avons vu que les techniques de Monte Carlo utilisaient des nombres aléatoires, c'est à dire tirés au sort. Pour obtenir ces nombres, on peut utiliser des tables (voir la table 12.1). Lorsqu'on utilise un calculateur, on construit des nombres pseudo-aléatoires : ils diffèrent des nombres aléatoires en ce que, lorsque le ou les premiers sont arbitrairement choisis, toute la suite est complètement déterminée : la séquence est alors reproductible, ce qui permet de vérifier les programmes dans lesquels ils sont utilisés. Le point important est que leurs propriétés sont identiques à celles des nombres aléatoires. Ceci en fait ne peut être prouvé, mais on peut soumettre les nombres pseudo-aléatoires aux mêmes tests que les nombres aléatoires, et les utiliser si les tests sont satisfaits.

26099	65801	69870	84446	58248	21282	56938	54729	67757
71874	61692	80001	21430	02305	59741	34262	15157	27545
08774	29689	42245	51903	69179	96682	91819	60812	47631
37294	92028	56850	83380	05912	29830	37612	15593	73198
33912	37996	78967	57201	66916	73998	54289	07147	84313

Table 12.1 : Nombres aléatoires

Une des formules les plus utilisées pour engendrer une suite de nombres pseudo-aléatoires à distribution uniforme est :

$$x_i = a x_{i-1} + c \quad (\text{modulo } m) \quad (12.2)$$

Ceci signifie que le nombre  $x_i$  est égal au reste de la division par  $m$  de  $a x_{i-1} + c$ , où  $m$ ,  $a$  et  $c$  sont des constantes.

Exemple 12.2: si on choisit  $m = 16$ ,  $a = 3$ ,  $c = 1$  et  $x_0 = 2$ , on a :

$a x_0 + c = 7$ , divisé par 16, quotient 0, reste 7 :  $x_1 = 7$  ;  $a x_1 + c = 22$ , divisé par 16 quotient 1, reste 6, donc  $x_2 = 6$ , etc... La séquence engendrée est donc :

$$2, 7, 6, 3, 10, 15, 14, 11, 2, 7, 6, \dots$$

La séquence est périodique. On a intérêt à ce que la période soit la plus longue possible. Le cas le plus fréquent est  $c = 0$ ,  $m = 2^N$  (car un calculateur travaille facilement en binaire),  $N$  étant généralement voisin de 30 ou 40. On obtient alors une période de  $2^{N-2}$  à condition que  $a$  soit une puissance impaire de 5 (on la prend en général élevée) et que  $x_0$  soit impair. Ainsi :

$$x_i = a x_{i-1} \quad (\text{mod } m = 2^N) \quad (12.3)$$

{ Exemple 12.3 : avec  $a = 5$ ,  $x_0=3$  et  $N = 5$ , la séquence s'écrit :

{     3, 5, 11, 23, 19, 31, 27, 7, 3, 5, 11, ...

Les nombres obtenus ont une distribution uniforme (dite aussi rectangulaire). La plupart des calculateurs (et même des calculatrices de poche), donnent des séquences de nombres pseudo-aléatoires à distribution rectangulaire sur  $[0,1]$ . Ces nombres  $r_i$  sont obtenus facilement à partir des  $x_i$  donnés par (12.2) ou (12.3) en remarquant que le reste d'une division est inférieur au diviseur. Par suite :  $r_i = x_i/(m - 1)$ .

On a souvent besoin d'engendrer des nombres à distribution uniforme dans l'intervalle  $[a,b]$ . Pour ce faire, à tout  $r$  aléatoire uniformément distribué sur  $[0,1]$ , on associe  $\xi$  défini par :

$$\xi = a + (b - a) r \tag{12.4}$$

$$\xi \in [a, b]$$

Application en 3A (TP Coïncidences et superposition de deux disques de rayons  $r$ ) :

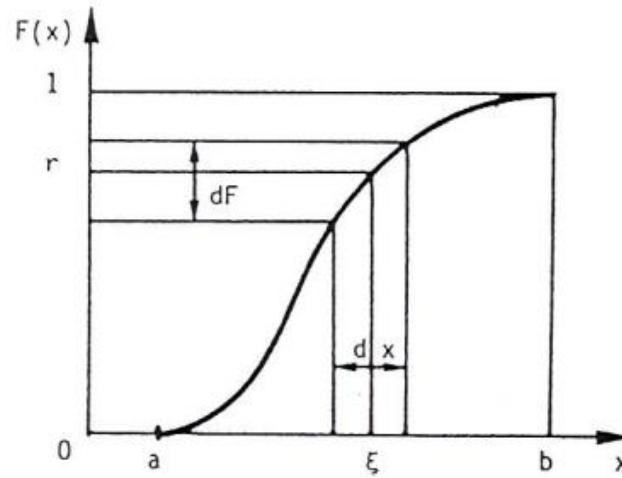
$$x \in [-r, r] \quad y \in [-r, r] \quad \text{avec la condition : } x^2 + y^2 \leq r^2$$

## Complément pour aller plus loin (recherche biblio):

On a souvent besoin d'engendrer des fonctions de distribution, c'est à dire d'engendrer des nombres aléatoires  $\xi$  dont la distribution n'est pas uniforme entre  $a$  et  $b$  ( $a$  et/ou  $b$  pouvant être infinis), mais vaut  $f(x)$ . Ceci signifie que, si on engendre un tel ensemble de nombres  $\xi$ , la proportion de ces nombres tels que  $x \leq \xi < x + dx$  vaut  $f(x)dx$ . Une manière équivalente d'exprimer cela est de dire que la probabilité que  $\xi$  tombe dans l'intervalle  $[x, x + dx]$  vaut  $f(x)dx$ . Soit  $F(x)$  la fonction de répartition de  $f(x)$ , définie par :

$$F(x) = \int_a^x f(u) du$$

(12.5)



Exemples: distribution de poisson ou distribution gaussienne

Lecture

## Exemple pour la distribution de poisson

Solution : la fonction de distribution vaut ici

$$f(t) = \rho e^{-\rho t} \quad (12.10)$$

Le temps moyen au bout duquel survient un événement (qui est aussi le temps moyen séparant deux événements successifs), s'écrit :

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t f(t) dt = 1/\rho . \text{ On a donc :}$$

$$\bar{t} = \tau = 1/\rho \quad (12.11)$$

Une telle loi décrit par exemple la désintégration d'une source radioactive, l'émission d'électrons de la cathode d'une diode à vide, les instants de collision d'une particule soumise à des chocs aléatoires, etc...

un nombre  $r$  étant tiré d'une

distribution rectangulaire sur  $[0,1]$ , on lui associe  $\xi$  tel que :

$$r = \left( \int_0^{\xi} \rho e^{-\rho t} dt \right) / \left( \int_0^{\infty} \rho e^{-\rho t} dt \right) = 1 - e^{-\rho \xi}$$

c'est à dire :

$$\xi = -\frac{1}{\rho} \ln (1 - r) \quad (12.12)$$

ou encore, puisque  $1-r$  est aussi un nombre aléatoire à distribution uniforme sur  $[0,1]$  :

$$\xi = -\frac{1}{\rho} \ln r = -\tau \ln r \quad (12.13)$$

Les instants aléatoires  $\xi$  ainsi construits simulent les instants auxquels surviennent les événements poissoniens de densité  $\rho$ .

Lecture

## Remarque générale sur les simulations Monte Carlo en physique

La qualité et la précision des résultats de la simulation réside dans la qualité des modèles de physique ou bases de données utilisées appelées « physics list » ou Libraries auquel fait appel le code pour propager sa particule.

Il faut apporter une attention particulière au choix des « physics list » qui sont rattachés au code et donc vérifier quelles correspondent bien à la physique étudiées, aux particules, aux énergies voulues et aux processus physique susceptibles de se produire. Sans cette vérification un code sortira généralement toujours un résultat mais celui-ci pourra être incomplet et différent du résultat réel.

Les » «physics list » peuvent être des datas expérimentales ou si les données n'existent pas des modèles.

Il existe de nombreuses approximations et modèles différents pour décrire la même interaction.

Aussi certains utilisateurs voudront peut-être un modèle moins précis mais nettement plus rapide pour une interaction tandis que d'autres ont besoin de la description la plus précise.

# Comparaison des bases de données nucléaires pour les neutrons.

Site web ENDF de IAEA : <https://www-nds.iaea.org/exfor/endf.htm>

Manual » ENDF-6 Help » Plot+ Databases » Medical | NGAtlas | RIPL | FENDL | IRDFF | EXFOR | CINDA | Web-API

## Evaluated Nuclear Data File (ENDF)

Database Version of 2023-08-25

Software Version of 2023-10-31



**News & History**

2023/10 New software feature: plot fission product yield from EXFOR and ENDF as a function of energy [howto]  
2023/08 Updated JENDL-5 Japanese evaluated nuclear data library (2021) [Errata](#) including update-13, August 10, 2023 [page]  
2023/08 New library: INDEN-Aug2023 evaluations produced by International Nuclear Data Evaluators Network (coord. by the IAEA) [page]  
2023/03 New software feature: plotting covariances of the average number of neutrons per fission MF31 [example]  
2023/02 New software tool: EE-View - fast experimental-evaluated data viewer [about] → go to SIG:[eview][eview1]; DA:[eview-da]

Core nuclear reaction database contain recommended, evaluated cross sections, spectra, angular distributions, fission product yields, photo-atomic and thermal scattering law data, with emphasis on neutron induced reactions. The data were analyzed by experienced nuclear physicists to produce recommended libraries for one of the national nuclear data projects (USA, Europe, Japan, Russia and China). All data are stored in the internationally-adopted ENDF-6 format maintained by CSEWG. See database summary [\[here\]](#).

**Standard Request** Examples: [1](#) [2](#) [3](#) [4](#) [5](#) [6](#) [7](#)

Parameters:  Target  Reaction  Quantity  More Parameters...

Libraries:  All  Selected   ▼ How to plot

»  Major Libraries  Special Libraries  
»  IAEA Project Libraries  Archival  
»  Derived

Options: Sort by:  Reactions  Evaluations

Clone Request:   Feedback:

La base de données de base des réactions nucléaires contient des sections efficaces recommandées et évaluées, des spectres, des distributions angulaires, des rendements en produits de fission, des données sur les lois de diffusion photoatomique et thermique, en mettant l'accent sur les réactions induites par les neutrons.

Les données ont été analysées par des physiciens nucléaires expérimentés afin de produire des bibliothèques recommandées. Toutes les données sont stockées dans le format ENDF-6 adopté au niveau international. Voir le résumé de la base de données.

On peut ainsi retrouver les librairies connues en neutronique: ENDF, JEFF, JENDL ...

## Exemple sur G4

Packaged Physics Lists: naming convention.

### Reference physics lists

- QGSP\_BERT, QGSP\_BERT\_EMV, QGSP\_BERT\_HP, **QGSP\_BIC**,  
FTFP\_BERT, LBE, LHEP

<https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/index.html>

[http://geant4.in2p3.fr/IMG/pdf\\_PhysicsLists.pdf](http://geant4.in2p3.fr/IMG/pdf_PhysicsLists.pdf)

### Extrait sur G4beamline

FTFP\_BERT\_HP identical to FTFP\_BERT except that neutrons of 20 MeV and lower use the High Precision neutron models and cross sections to describe elastic and inelastic scattering, capture and fission. The G4NDL database is required.

QGSP\_BIC Similar to QGSP\_BERT, except the BIC binary cascade model is used.

QGSP\_BIC\_HP identical to QGSP\_BIC except that neutrons of 20 MeV and lower use the High Precision neutron models and cross sections to describe elastic and inelastic scattering, capture and fission. The G4NDL database is required.

Rmq: les "physics list" utilisées par G4beamline sont les mêmes que celles de G4. Vérifier tout de même les accessibilités

## Précision du résultat et réduction de variance :

Tout résultat obtenu par un calcul Monte Carlo est entaché d'une incertitude qui varie comme l'inverse de la racine du nombre n de particules simulées !

$$\frac{1}{\sqrt{n}}$$

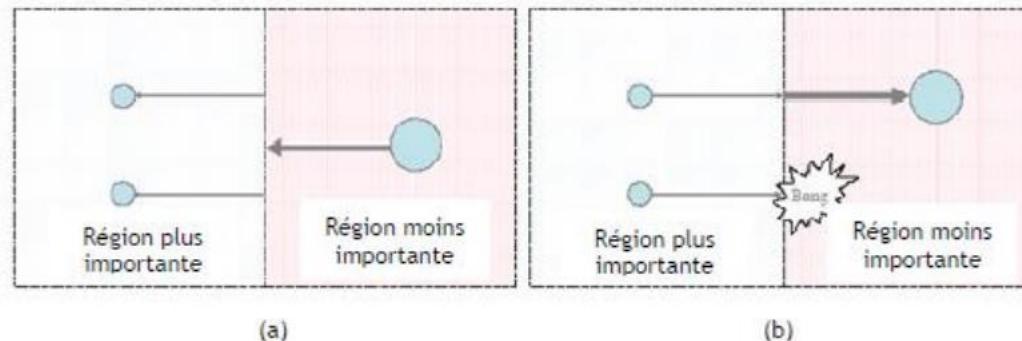
Le Théorème Central Limite nous donne la vitesse de convergence en  $1/\sqrt{n}$ .

La vitesse de convergence est assez lente, car la variance décroît de façon proportionnelle à  $1/n$  où n est le nombre de particules simulées.

Il existe de nombreuses approches pour améliorer la convergence des calculs Monte Carlo. Ces techniques s'appellent la réduction de variance. Elles permettent de jouer sur le poids statistique (nombre de particules).

Ainsi, afin de réduire la probabilité qu'une particule se dirigeant vers une région de l'espace qui contribue de façon importante au résultat soit perdue par fuite ou absorption. Il est possible de suivre plusieurs particules au lieu d'une seule à partir d'un point donné de l'espace. Ce procédé est nommé le « splitting »

A l'inverse, lorsqu'une particule se dirige vers une région peu importante de l'espace d'intérêt, un certain nombre de particules sont éliminées selon une probabilité ( $1-p$ ) alors que les autres particules survivent avec une probabilité p. Ce procédé est nommé la « russian roulette »



Principe du « Splitting » (a) et de la « Russian roulette » (b) [S.Lamart, 2008]

## Temps de calcul et facteur de mérite :

La précision relative s'améliorant en augmentant le nombre de particules tests, on aura tendance à augmenter ce nombre le plus possible mais obligatoirement le temps de simulation augmente également proportionnellement. On est donc amené à faire un compromis. Afin de juger des performances d'une méthode de simulation entre précision et temps de calcul, on définit un critère appelé facteur de qualité, facteur de mérite ou aussi figure de mérite «Figure Of Merit » (FOM):

L'erreur statistique,  $\sigma^2$  varie en  $1/n$ , où  $n$  est le nombre de particules simulées, tandis que, pour  $n$  suffisamment grand, le temps de calcul,  $t$ , est proportionnel à  $n$ . Ainsi le produit  $\sigma^2 t$  ne dépend pas du nombre de particules simulées et peut permettre de comparer différentes simulations pour lesquelles ce nombre de particules est variable.

variance =  $\sigma^2$  varie en  $\frac{1}{n}$  ou  $\frac{1}{t}$

$$\sigma^2 = \frac{Cte}{t}$$

$$Cte = \sigma^2 t$$

$$FOM = \frac{1}{\sigma^2 t}$$

Où  $\sigma$  est la déviation standard ou l'écart type réel de la variable étudiée et  $t$  le temps de calcul.

Ce nombre est une mesure de la qualité statistique du résultat incluant le temps de simulation

Un facteur de mérite est une quantité utilisée pour caractériser les performances d'un dispositif, d'un système ou d'une méthode, par rapport à ses alternatives.

Il faut regarder l'évolution de la FOM lorsque l'on change les conditions de calculs:  
temps, réduction de variance, troncation,...

La valeur de FOM obtenue la plus grande correspond à la condition d'utilisation ou la technique utilisée est la plus optimale.

## Exemple de comparaison FOM

Soit quatre méthodes Monte Carlo différentes de calcul d'une même variable.

Code Monte Carlo	Temps de simulation (seconde)	Ecart type associée à la variable ( $\sigma$ )	$FOM = \frac{1}{\sigma^2 t}$	Classement des différents code vis-à-vis de cette variable
Code 1	1	2	0,25	
Code 2	4	1	0,25	
Code 3	2	1	0,5	
Code 4	5	1	0,2	

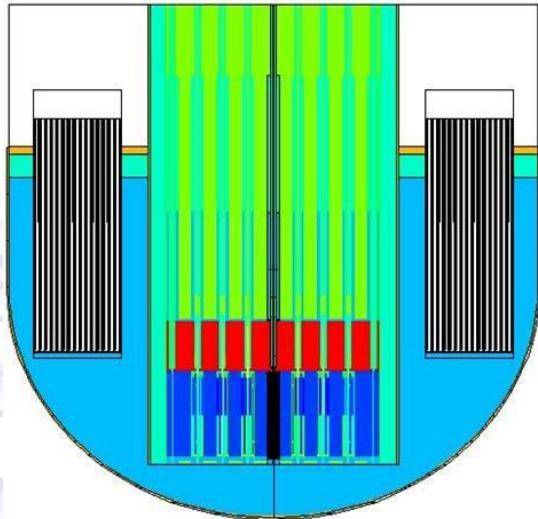
Retrouver un exposé sur cette notion de réduction de variance et de FOM proposé par Jan Dufek : <https://www.youtube.com/watch?v=ncVoKKn4XWU>

## MCNPX (Monte Carlo N-Particle eXtended)

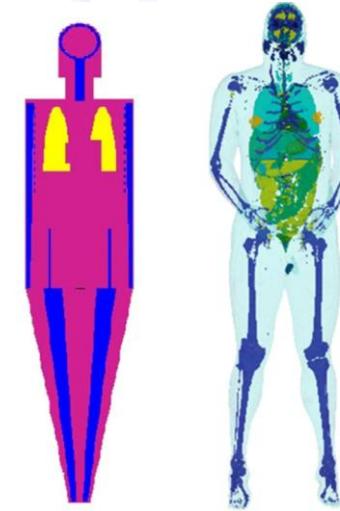
Le code de transport Monte-Carlo à N particules (en anglais Monte-Carlo N-Particle transport code, d'où son nom courant: MCNP) est un logiciel de simulation numérique utilisant la méthode de Monte-Carlo pour modéliser des processus de physique nucléaire.

Il a été développé par le Laboratoire national de Los Alamos, lors du projet Manhattan durant la Seconde Guerre mondiale pour la simulation du fonctionnement des armes nucléaires. Il est aussi capable de simuler les interactions de particules, tels les photons, les électrons ou les neutrons. L'utilisation du code se fait sous autorisation de l'IAEA (International Atomic Energy Agency).

Ce code est très utilisé en neutronique ( simulation de réacteurs) et aussi en dosimétrie - radioprotection où il est la référence en calcul de simulation de Dose.



MCNPX reactor model



Radiation Dosimetry of Inhaled Radioactive Aerosols:  
MCNP Transport Simulations of Radionuclides in the Lung

## GEANT4

Geant4 (pour GEometry ANd Tracking) est un code de simulation pour « la simulation du suivi de particules à travers la matière » par la méthode de Monte-Carlo. Il a été développé pour les expériences de physiques des particules par le CERN. Il a été le premier outil de ce domaine à utiliser le C++ et une méthodologie de programmation orientée objet.

Le développement, la maintenance et le support des utilisateurs sont effectués par une collaboration internationale. Les domaines d'application sont la physique des hautes énergies, la médecine, la physique des accélérateurs et l'astrophysique.

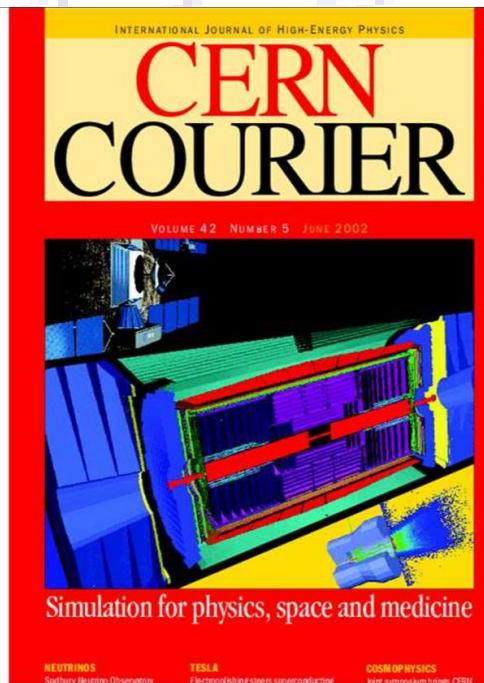
Geant4 et son code source sont librement accessibles sur le site web du projet.

### Technology transfer

#### Particle physics software aids space and medicine

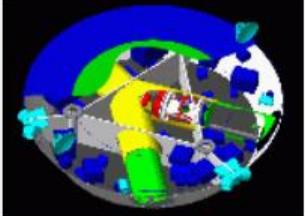
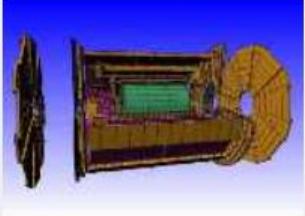
Geant4 is a showcase example of technology transfer from particle physics to other fields such as space and medical science [...].

CERN Courier, June 2002

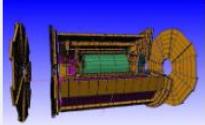
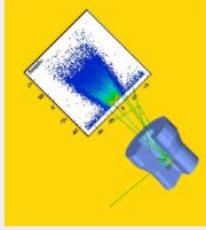
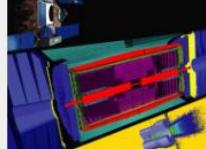


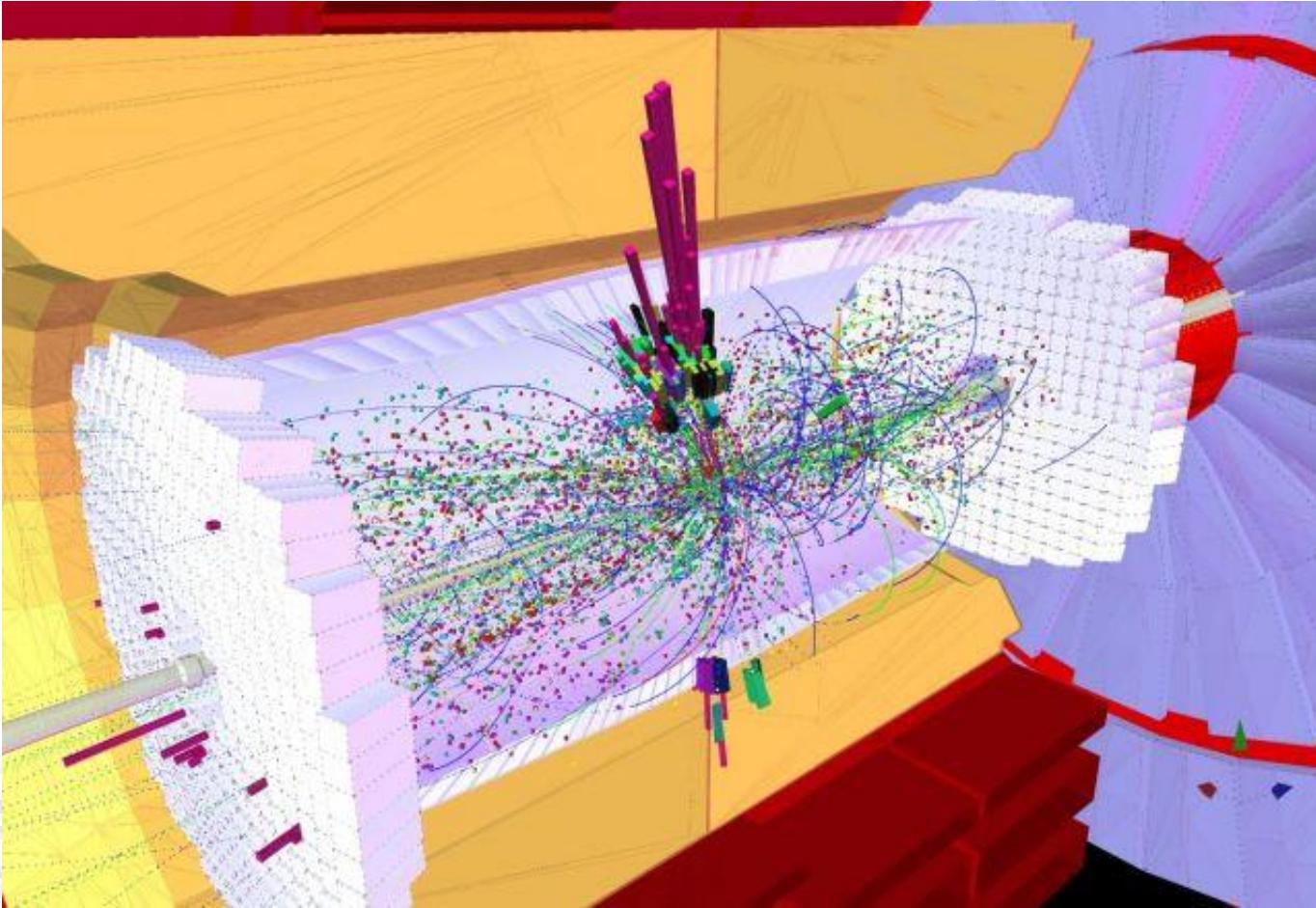
# GEANT 4

<https://geant4.web.cern.ch/>

Applications	User Support	Publications	Collaboration
 A sampling of applications, technology transfer and other uses of Geant4	 Getting started, guides and information for users and developers	 Validation of Geant4, results from experiments and publications	 Who we are: collaborating institutions, members, organization and legal information

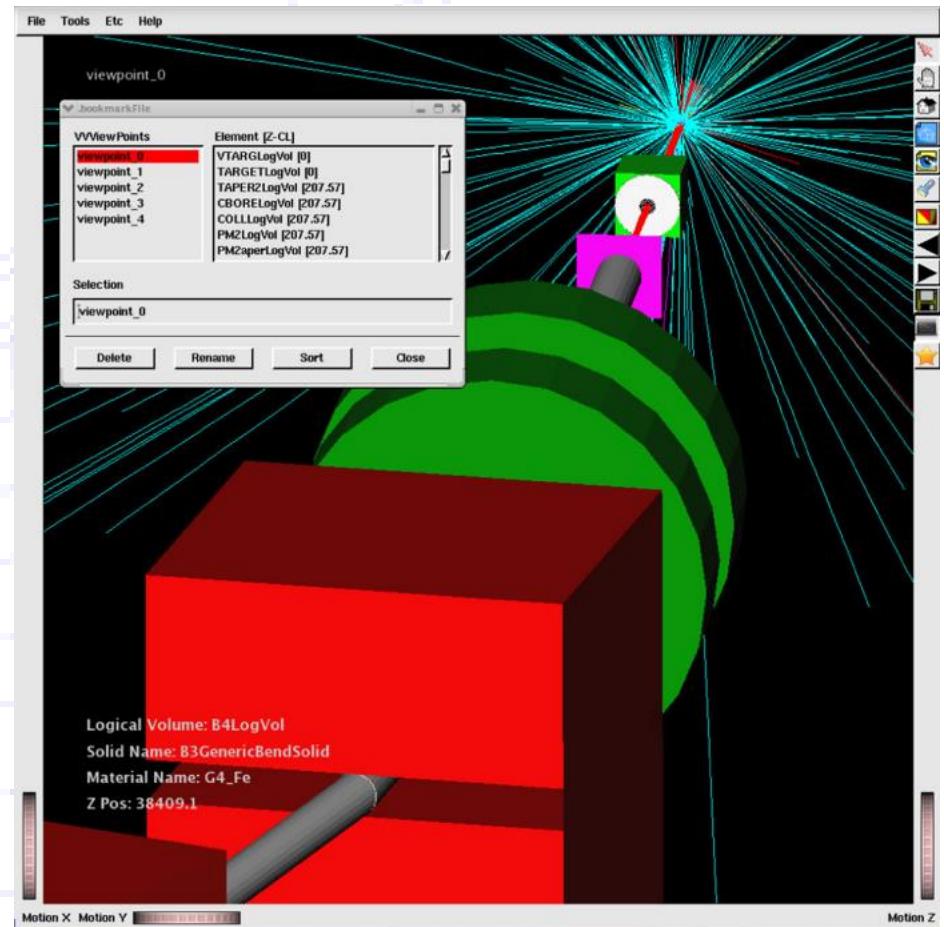
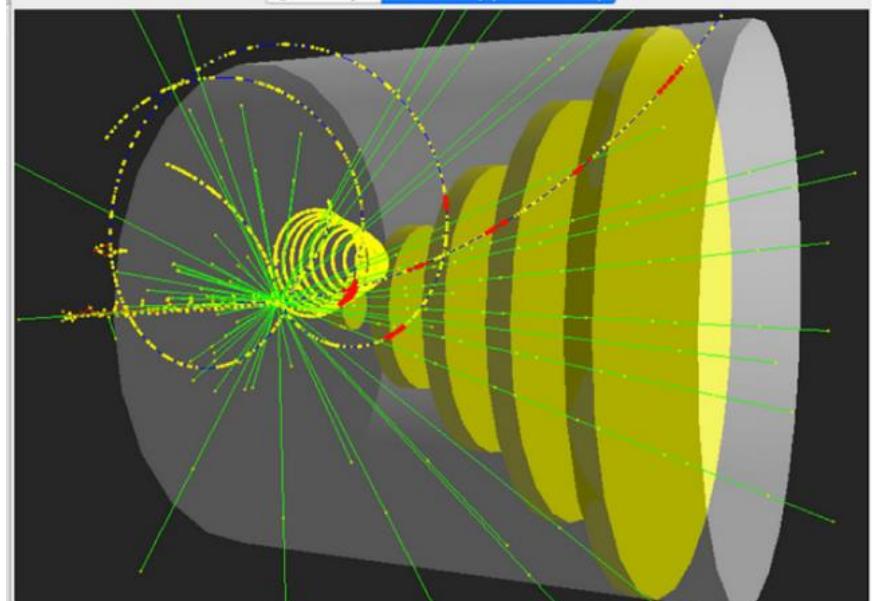
<https://geant4.web.cern.ch/applications>

High Energy Physics	Space and Radiation	Medical	Technology Transfer
 <a href="#">&gt;&gt;more high energy physics</a>	 <a href="#">&gt;&gt;more space and radiation</a>	 <a href="#">&gt;&gt;more medical</a>	 <a href="#">&gt;&gt;more technology transfer</a>



Simulation dans Geant4 du détecteur CMS au CERN. Image collaboration CMS

# Explorations in GEANT4



J. Allison and al

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 835 (2016) 186–225

Contents lists available at ScienceDirect

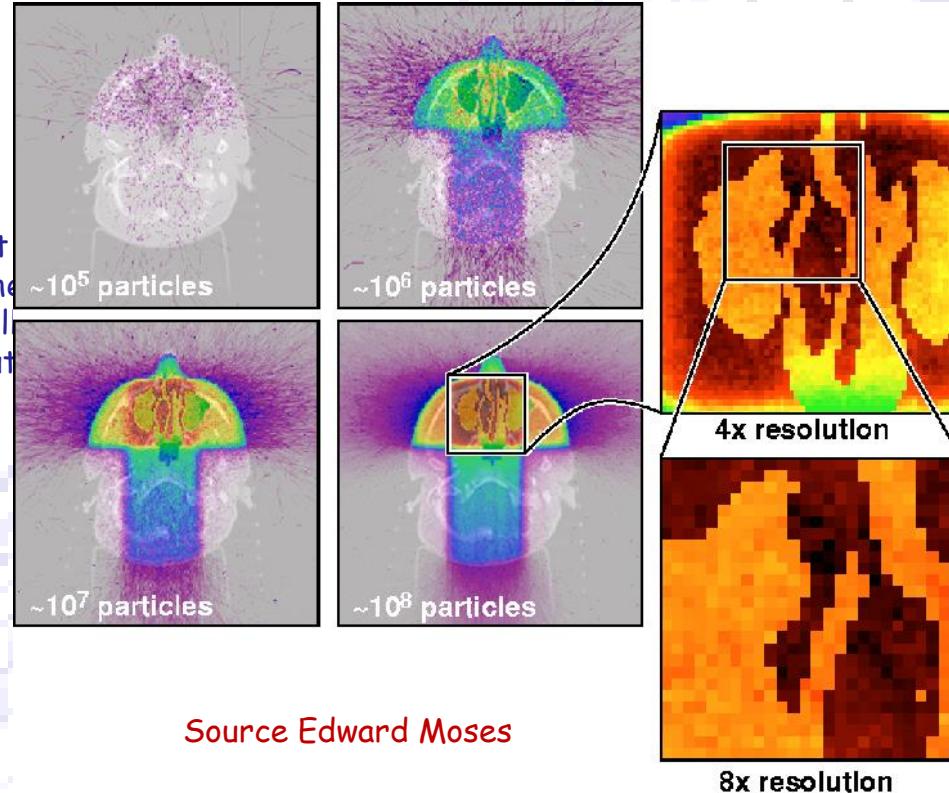
Nuclear Instruments and Methods in  
Physics Research A

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/nima](http://www.elsevier.com/locate/nima)



## Application Médicale GATE

Diagramme montrant  
faisceaux de radiothérapie  
sont suivies, une meilleure  
calculée à une résolution

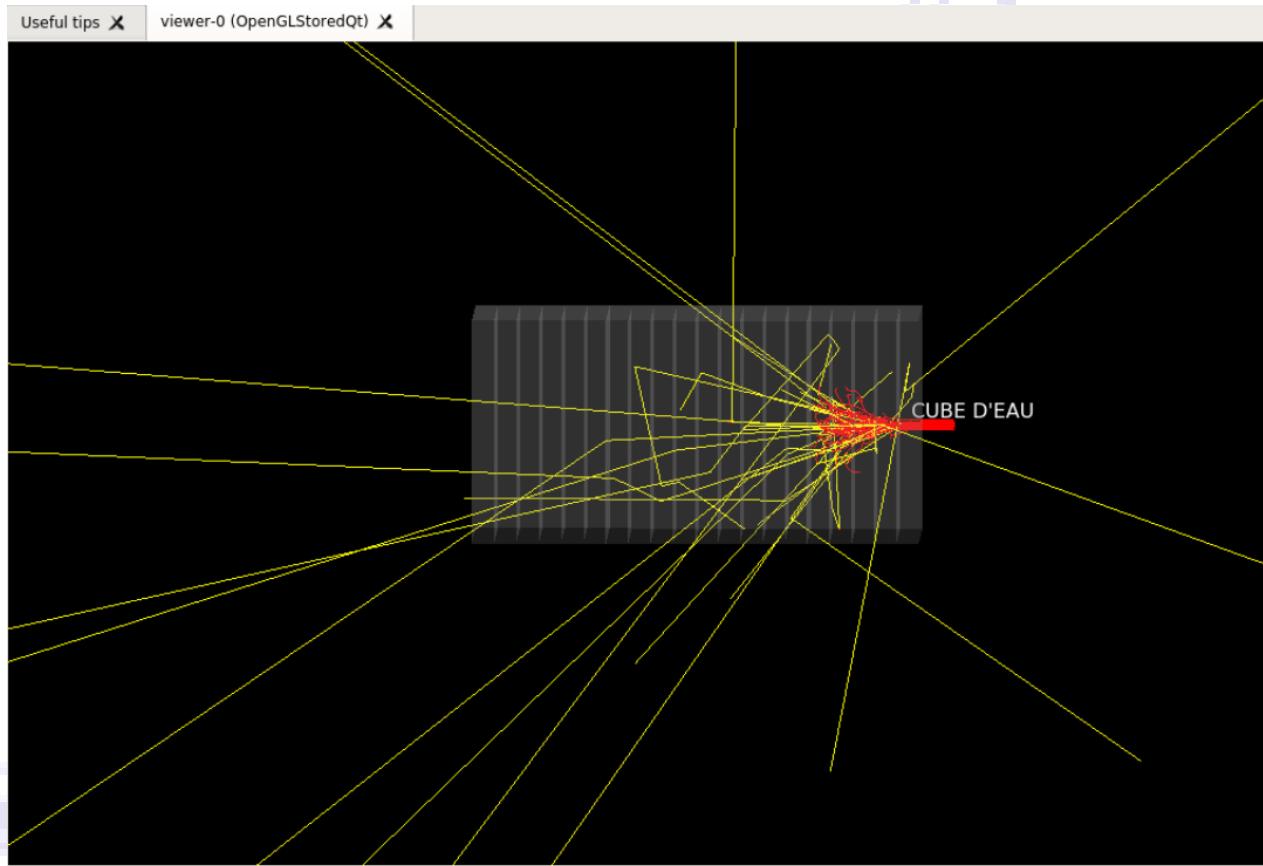


Source Edward Moses

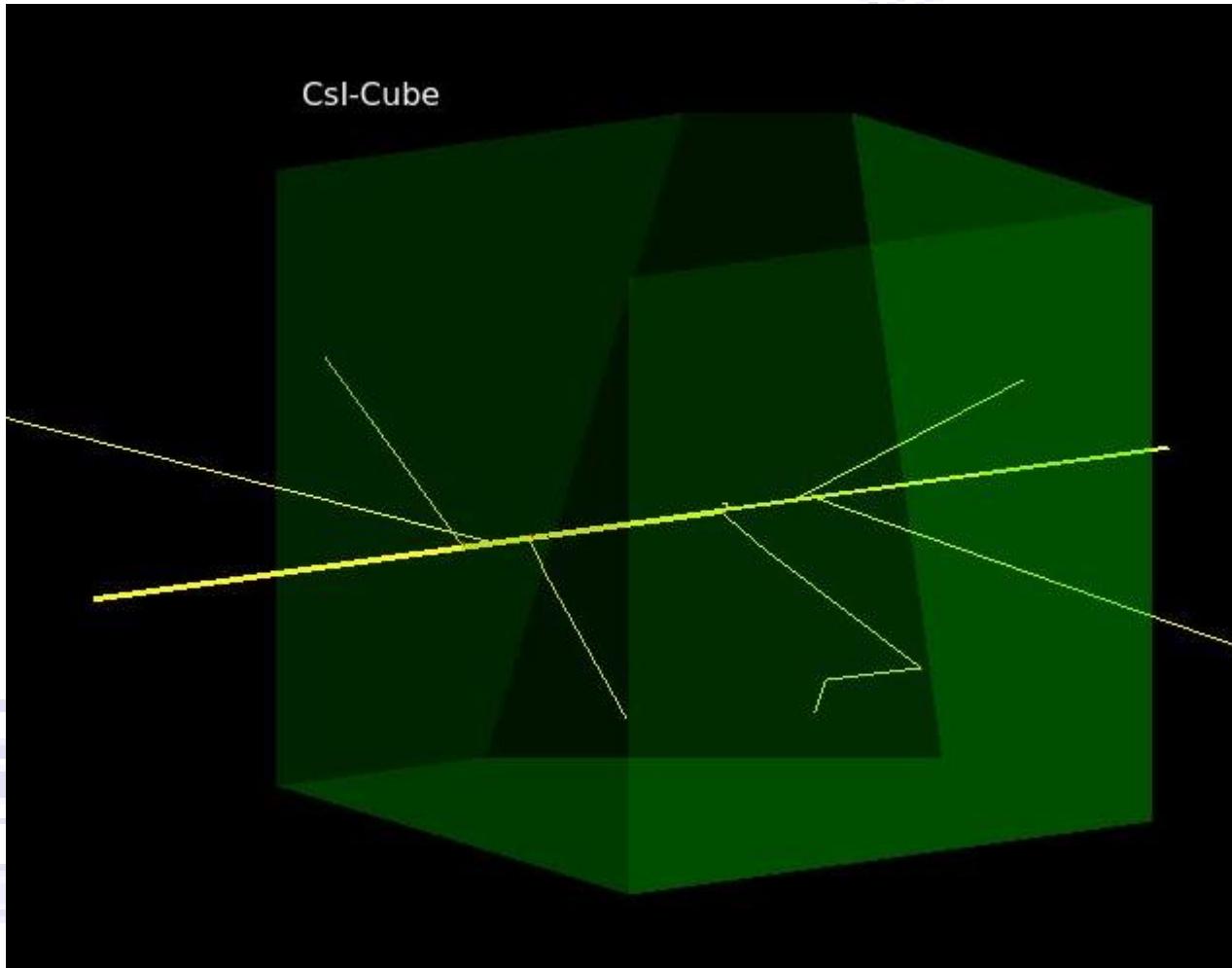
**TPS** : Le Système de Planification du Traitement (TPS) permet de calculer une répartition optimale des doses. Les images obtenues par scanner sont ensuite transférées un système de planification du traitement. Par la suite, le radio-oncologue marque sur celles-ci la région tumorale devant être irradiée.

## G4beamline Utilisation simplifiée avec ambition beaucoup plus modeste

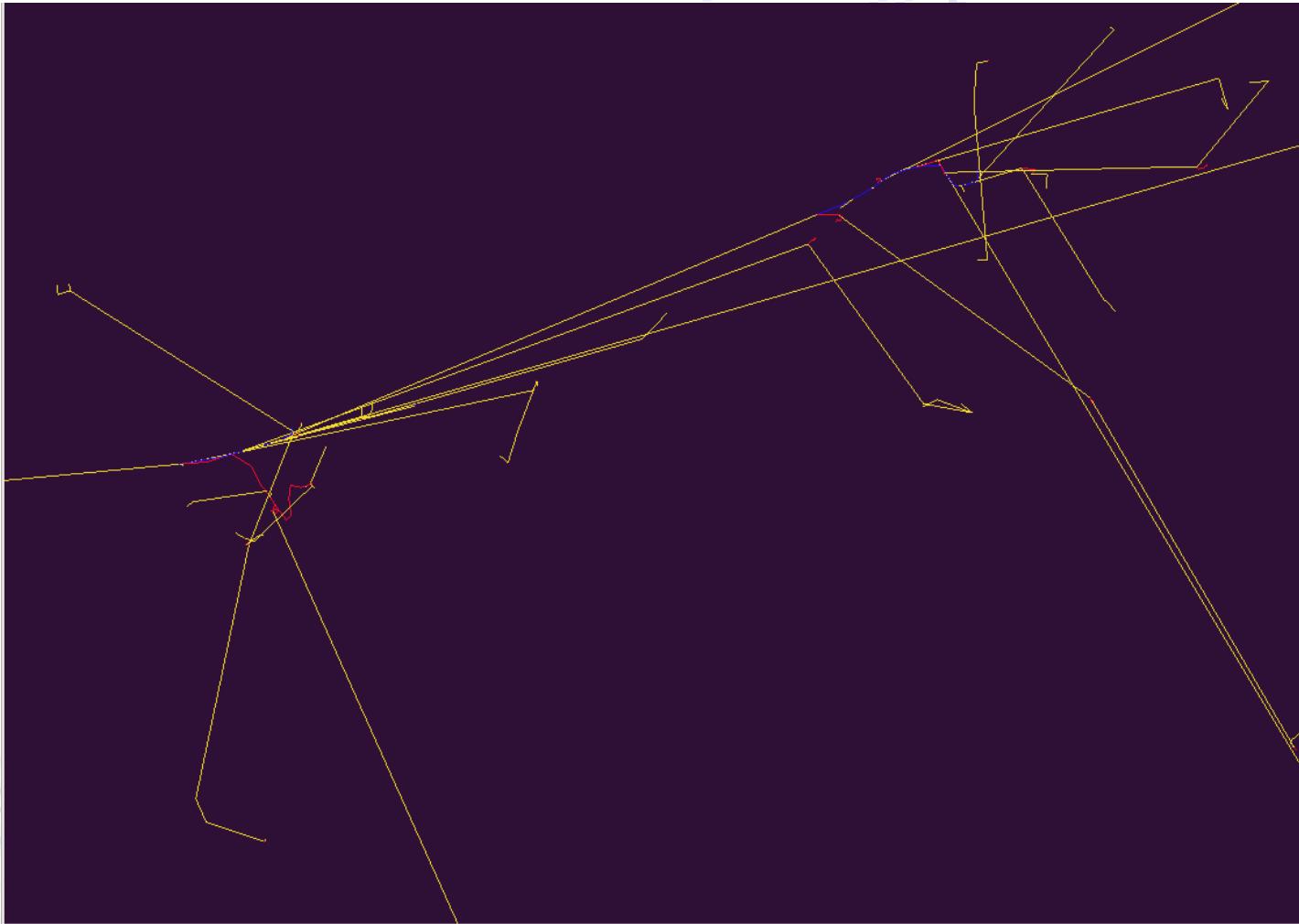
!!!



Simulation dans G4beamline. Interaction électron 10MeV dans l'eau. TP ENSI 2A IPC  
2021

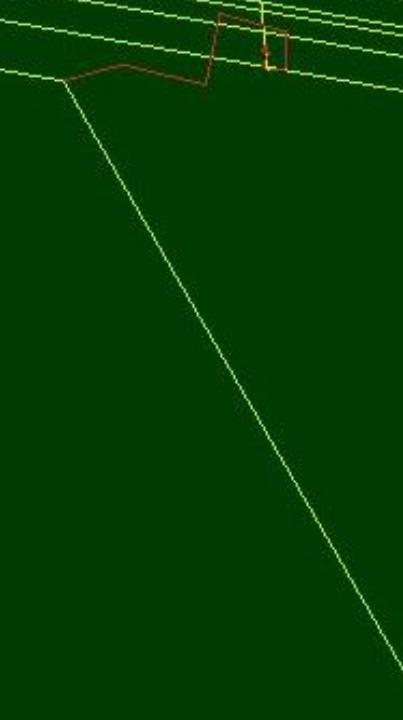


Simulation dans G4beamline. Interaction photon gamma de 1 MeV dans scintillateur CsI



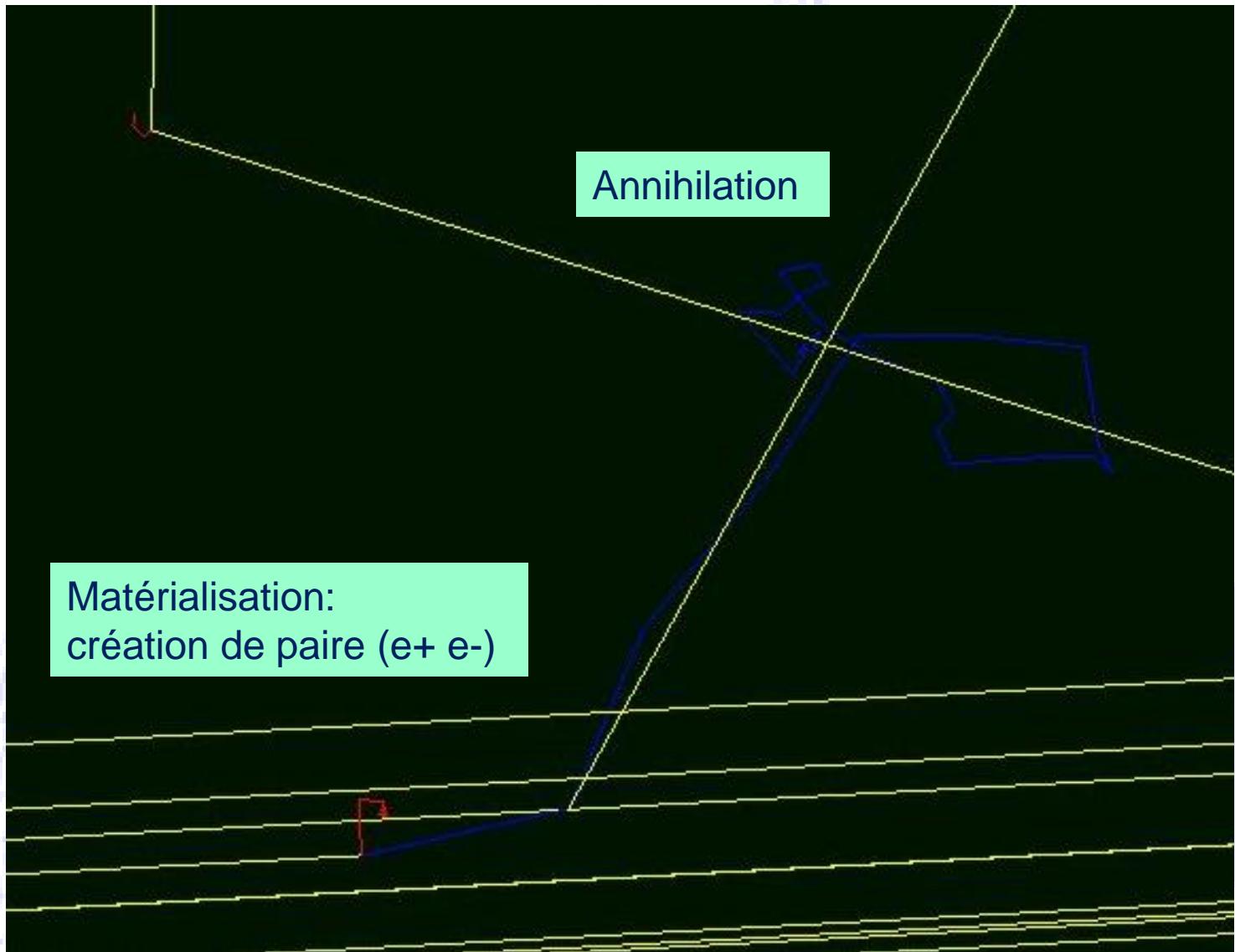
Simulation dans G4beamline. Mise en évidence Matérialisation et Annihilation Photon 10 MeV dans bloc acier. Gamma (jaune), e+ (bleu), e- (rouge).

## Diffusion (Scattering)



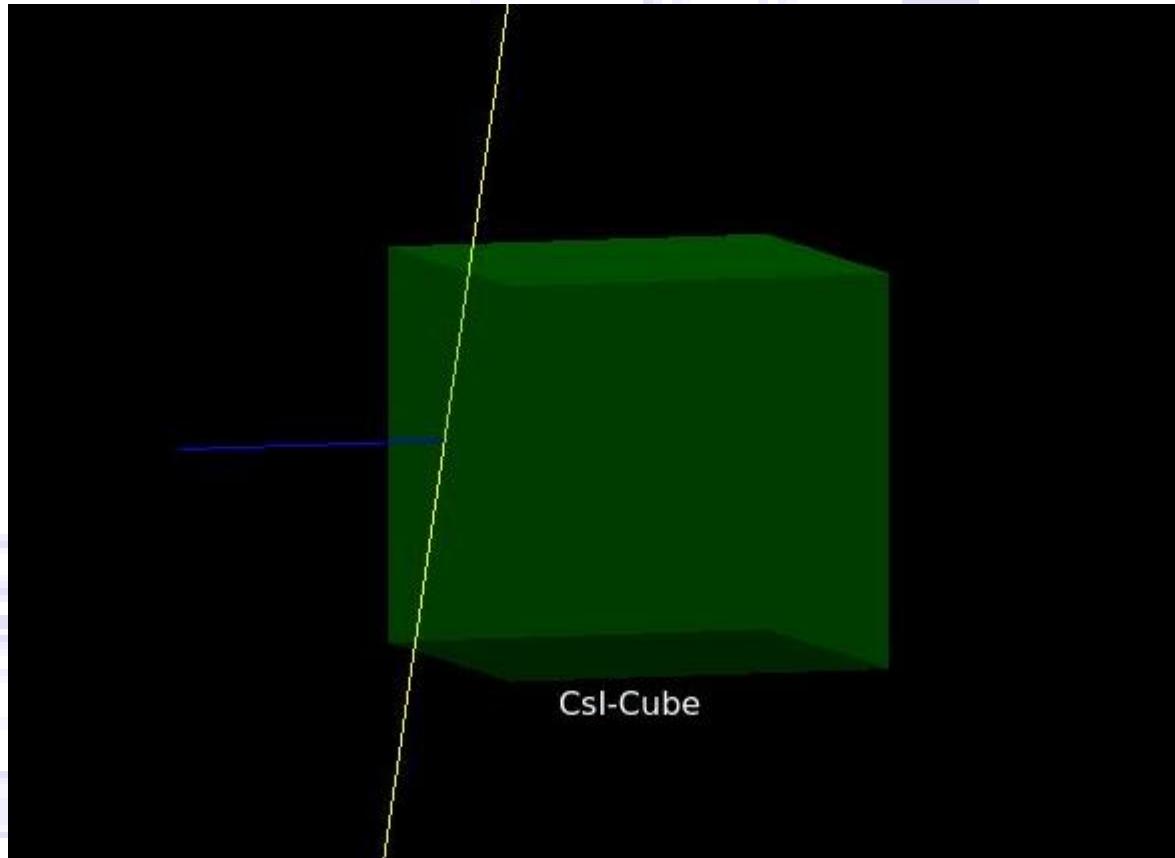
Diffusion Compton: photon (jaune) électron (rouge).

30



Photon (jaune), électron (rouge), positron (bleu).

## Processus d'annihilation



positron (bleu), photon (jaune).

Application en TP 3A mesures de coïncidences

## Préparation des séances de TP simulation Monte Carlo

Reprendre les TP du 1<sup>er</sup> semestre.

Relire et comprendre l'interprétation des résultats obtenus.

Les résultats pourront être comparés avec les simulations.

Exple 1 : - interaction des photons dans le plomb, (cuivre, aluminium)

:

Coefficient d'absorption du plomb ( $\mu$  en  $\text{cm}^{-1}$ ) Cuivre et Alu .

Exple 2 : Etude du détecteur à scintillation au iodure de sodium (NaI)

Détermination de l'efficacité.



<https://www.nist.gov/>

## FEATURED TOPICS



ARTIFICIAL INTELLIGENCE



CLIMATE



COMMUNICATIONS



CYBERSECURITY



HEALTH & BIOSCIENCE



INFRASTRUCTURE



MANUFACTURING



QUANTUM SCIENCE

The screenshot shows the NIST Physical Measurement Laboratory (PML) website. The header includes the NIST logo, a search bar, and various navigation links. The main content area features a large blue banner with the text "PHYSICAL MEASUREMENT LABORATORY". Below the banner, there is a sidebar with links for "About PML", "Divisions", and "Products/Services", along with social media icons for Facebook, LinkedIn, Twitter, and Email. The main content area is titled "Physical Reference Data" and includes sections for "Elemental Data Index" and "Periodic Table: Atomic Properties of the Elements".

About PML

Divisions

Products/Services

The Official U.S. Time

Amazing Stories of  
Measurement

General Interest

Measurements &  
Calibrations

Measuring The Cosmos

Million-Pound Makeover

NIST-on-a-Chip Portal

## Physical Reference Data



### [Elemental Data Index](#)

Provides access to the holdings of NIST Physical Measurement Laboratory online data organized by element.

### [Periodic Table: Atomic Properties of the Elements](#)

Contains NIST critically-evaluated data on atomic properties of the elements.  
Suitable for high-resolution color printing for desk or wall-chart display.

### [Physical Constants](#)

An official website of the United States government [Here's how you know](#)

**NIST**  
PHYSICAL MEASUREMENT LABORATORY

- About PML
- Divisions
- Products/Services
- News/Multimedia
- Programs/Projects
- Facilities
- Email Newsletter

CONNECT WITH US



## X-Ray Mass Attenuation Coefficients

### NIST Standard Reference Database 126

Last Update to Data Content: July 2004 | NISTIR 5632 | [Version History](#) | [Disclaimer](#)

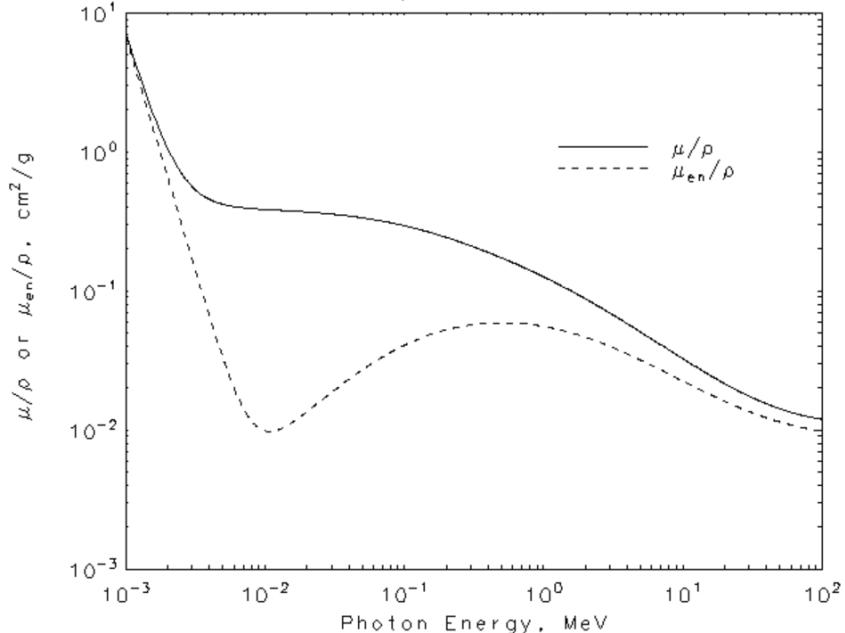
DOI: <https://dx.doi.org/10.18434/T4D01F>

#### Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients from 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest\*

J. H. Hubbell\* and S. M. Seltzer  
Radiation Physics Division, PML, NIST

© 1989, 1990, 1996 copyright by the U.S. Secretary of Commerce on behalf of the United States of America. All rights reserved.  
NIST reserves the right to change for these data in the future.

Z = 1, HYDROGEN



Hydrogen  
Z = 1

HTML table format

Energy (MeV)	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$\mu_{\text{en}}/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
1.0000E-03	7.217E+00	6.820E+00
1.5000E-03	2.148E+00	1.752E+00
2.0000E-03	1.059E+00	6.643E-01
3.0000E-03	5.612E-01	1.693E-01
4.0000E-03	4.546E-01	6.549E-02
5.0000E-03	4.193E-01	3.278E-02
6.0000E-03	4.042E-01	1.996E-02
8.0000E-03	3.914E-01	1.160E-02
1.0000E-02	3.854E-01	9.849E-03
1.5000E-02	3.764E-01	1.022E-02
2.0000E-02	3.695E-01	1.355E-02
3.0000E-02	3.570E-01	1.863E-02
4.0000E-02	3.458E-01	2.315E-02
5.0000E-02	3.355E-01	2.709E-02
6.0000E-02	3.260E-01	3.053E-02
8.0000E-02	3.091E-01	3.620E-02

Hydrogen  
Z = 1

ASCII format

Energy (MeV)	$\mu/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	$\mu_{\text{en}}/\rho$ ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )
1.00000E-03	7.217E+00	6.820E+00
1.50000E-03	2.148E+00	1.752E+00
2.00000E-03	1.059E+00	6.643E-01
3.00000E-03	5.612E-01	1.693E-01
4.00000E-03	4.546E-01	6.549E-02
5.00000E-03	4.193E-01	3.278E-02
6.00000E-03	4.042E-01	1.996E-02
8.00000E-03	3.914E-01	1.160E-02
1.00000E-02	3.854E-01	9.849E-03
1.50000E-02	3.764E-01	1.022E-02
2.00000E-02	3.695E-01	1.355E-02
3.00000E-02	3.570E-01	1.863E-02
4.00000E-02	3.458E-01	2.315E-02
5.00000E-02	3.355E-01	2.709E-02
6.00000E-02	3.260E-01	3.053E-02
8.00000E-02	3.091E-01	3.620E-02

<https://www.nist.gov/pml/x-ray-and-gamma-ray-data>

NIST  
PHYSICAL MEASUREMENT LABORATORY

- About PML
- Divisions
- Products/Services
- News/Multimedia
- Programs/Projects
- Facilities
- Email Newsletter

CONNECT WITH US

## X-Ray and Gamma-Ray Data

- [X-Ray Attenuation and Absorption for materials of Dosimetric Interest](#)
- [XCOM: Photon Cross Sections Database](#)
- [Bibliography of Photon Attenuation Measurements](#)
- [X-Ray Form Factor, Attenuation and Scattering tables](#)
- [X-Ray Transition Energies](#)

### [X-Ray Attenuation and Absorption for materials of Dosimetric Interest](#)

J. H. Hubbell and S. M. Seltzer

Tables and graphs of computed photon mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20 MeV are presented for all of the elements ( $Z = 1$  to 92) and for 48 compounds and mixtures of radiological interest. These coefficients are basic quantities used in calculations of the penetration and the energy deposition by photons (x-ray, gamma-ray, bremsstrahlung) in biological, shielding, and other materials.

## X-ray Transition Energies Database

Search for X-ray transition energies by element(s), transition(s), and/or energy/wavelength range.

By Element(s)

- All Elements
- 10 Neon (Ne)
- 11 Sodium (Na)
- 12 Magnesium (Mg)
- 13 Aluminum (Al)
- 14 Silicon (Si)
- 15 Phosphorus (P)
- 16 Sulfur (S)
- 17 Chlorine (Cl)
- 18 Argon (Ar)

By Transition(s)

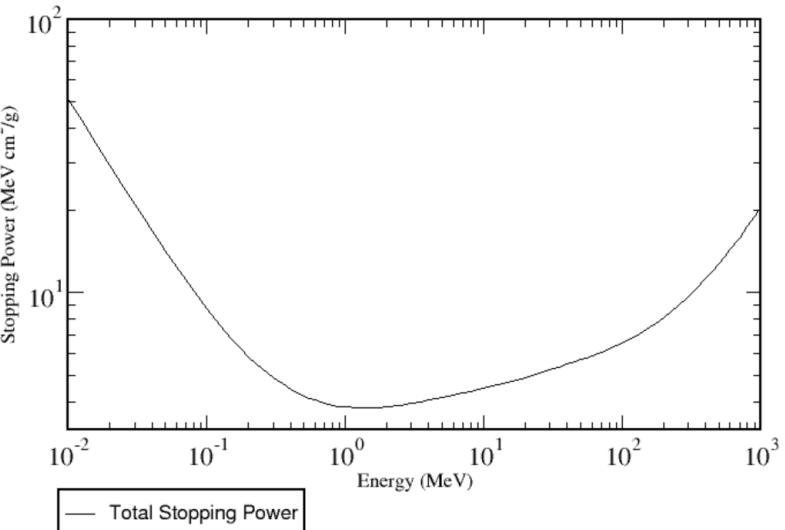
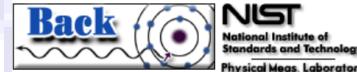
- All Transitions
- KL1
- KL2 (Kalpha2)
- KL3 (Kalpha1)
- KM1
- KM2 (Kbeta3)
- KM3 (Kbeta1)
- KM4 (Kbeta5 II)
- KM5 (Kbeta5 I)
- KN1

Get Transitions Reset

Energy/Wavelength

Range

Units  
 to   
 eV  
 Å



<https://www.nist.gov/pml/radiation-dosimetry-data>

## Radiation Dosimetry Data

### [Stopping-Power and Range Tables for Electrons, Protons, and Helium Ions](#)

M. J. Berger

The databases ESTAR, PSTAR, and ASTAR calculate stopping-power and range tables for electrons, protons, or helium ions, according to methods described in ICRU Reports 37 and 49. Stopping-power and range tables can be calculated for electrons in any user-specified material and for protons and helium ions in 74 materials.

<https://www.nist.gov/pml/stopping-power-range-tables-electrons-protons-and-helium-ions>